

БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 504.064

О.П. САЗОНЕНКО, канд. с.-х. наук¹E-mail: sazonenko@list.ru**С.Б. МЕЛЬНОВ**, д-р биол. наук, профессор¹¹Республиканское научно-исследовательское
унитарное предприятие «Бел НИЦ «Экология»,
г. Минск, Республика БеларусьE-mail: sbmelnov@gmail.com.

Статья поступила 5 июля 2019г.

**МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА
В СВЯЗИ С ХИМИЧЕСКИМ ЗАГРЯЗНЕНИЕМ ЗЕМЕЛЬ**

В данной статье представлен методический подход расчета коэффициента токсичности и индекса экологического риска для диагностики потенциального загрязнения земель. Данный методический подход основан на количественной оценке содержания химических элементов в почве и расчетного коэффициента токсичности элементов. Коэффициент токсичности рассчитывается с учетом содержания загрязняющих веществ в разных компонентах экосистемы.

Для апробации методического подхода мы провели расчет экологического риска загрязнения земель тяжелыми металлами в городах Минской области (Борисов, Воложин, Минск, Молодечно, Слуцк, Солигорск) и промышленных функциональных зонах республики (металлурго-машиностроительного комплекса и промышленно-строительного комплекса) по данным Национальной системы мониторинга окружающей среды Республики Беларусь. Содержание тяжелых металлов в почвах исследуемых территорий находилось в пределах: Pb 17,3-48,3 мг/кг; Zn 63,0-171; Cd 0,16-1,65; Ni 6,8-29,7; Cu 14,7-62,2; Mn 273-482 мг/кг, а хрома (Cr) – 67,9 мг/кг, мышьяка (As) – 3,07 и 19,5 мг/кг. Количественная оценка загрязняющих элементов показала, что металлурго-машиностроительный комплекс имеет высокий индекс экологического риска, и этот риск в значительной степени определяется присутствием кадмия. Территория промышленно-строительного комплекса имеет очень высокий индекс экологического риска в значительной степени за счет соединений, содержащих мышьяк и кадмий. В городах Минской области индекс экологического риска по изучаемым загрязняющим элементам на исследуемых территориях находится преимущественно на умеренном и низком уровнях. На этом фоне несколько выделяется Минск со значительным уровнем загрязнения отдельных территорий по соединениям меди.

Ключевые слова: экологический риск, тяжелые металлы, загрязнение земель.

SAZONENKO O., Cand. of Agricul. Sc.¹

E-mail: sazonenko@list.ru

MEL'NOV S., Doctor of Biol. Sc., Professor¹

¹Republican Research Unitary Enterprise «Bel NIC «Ecology», Minsk, Republic of Belarus

E-mail: sbmelnov@gmail.com.

METHODOLOGICAL APPROACH TO THE ESTIMATION OF ENVIRONMENTAL RISKS RELATED TO CHEMICAL CONTAMINATION OF LANDS

This article presents a methodical approach for calculating the toxicity factor and the ecological risk index for the diagnosis of potential land contamination. This methodical approach is based on a quantitative assessment of the environmental consequences of the entry of chemicals into the environment. It takes into account the current content of the pollutant in the soil, the background content of these pollutants and the calculated toxicity factor of the elements. The toxicity factor is calculated taking into account the content of pollutants in different components of the ecosystem.

To appropiate the methodology, we calculated the environmental risk of land contamination with heavy metals in the cities of the Minsk Region (Borisov, Volozhin, Minsk, Molodechno, Slutsk, Soligorsk) and the industrial functional zones of the Republic (metallurgical machine building complex and industrial complex) according to the National Environmental Monitoring System environment of the Republic of Belarus. The content of heavy metals in the soils of the study areas was in the range: Pb 17.3-48.3 mg / kg; Zn 63.0-171; Cd 0.16-1.65; Cr 67.9; Ni 6.8-29.7; Cu 14.7-62.2; As 3.07 and 19.5; Mn 273-482 mg / kg. The quantitative assessment of pollutants showed that the metallurgical-machine building complex has a high index of environmental risk, and this risk is largely determined by the presence of cadmium. The territory of the industrial complex has a very high index of environmental risk, largely due to compounds containing arsenic and cadmium. In cities of the Minsk region, the environmental risk index for the pollutants studied in soils is mainly at moderate and low levels. Against this background, Minsk stands out with a significant level of land contamination by copper compounds.

Keywords: environmental risk, heavy metals, land pollution.

Введение. Состояние экосистемы в существенной степени зависит от содержания антропогенных веществ в землях. Оценка относительных уровней загрязнения земель химическими элементами всегда неоднозначна. Ведь и при высоком содержании загрязняющих веществ в почвах экосистема будет существовать, будет изменяться и адаптироваться к почвенным условиям. В то же время известно, что небольшие колебания того или иного параметра экосистемы (в том числе и химического состава почв) приводят к существенным ее изменениям. Возможность быстрой оценки потенциального загрязнения земель всегда актуальна.

В настоящее время в республике оценка экологического риска определяется как произведение вероятности события на ожидаемые последствия. Если в течение периода может произойти несколько опасных собы-

тий, то показателем риска служит сумма последствий от всех возможных событий. Если говорить о практике применения данной оценки экологического риска, то ее можно применить только при наличии научно обоснованных статистических данных об опасных экологических последствиях при различных концентрациях загрязняющего вещества в почве. Таких научно обоснованных данных для оценки экологического риска загрязнения земель в республике недостаточно. В связи с чем для оценки экологического риска загрязнения земель предлагаем применять методический подход, предложенный в свое время Ларсом Хакансом [1]. Специфика данного методического подхода в том, что в нем учитывается содержание загрязняющих веществ в разных компонентах экосистемы (в почве, воде, растениях, животных). Это придает методическому подходу универсаль-

ность и объективность. Для реализации этого методического подхода в качестве диагностического инструмента на землях Беларуси рассчитали коэффициент токсичности с учетом имеющихся данных в республике.

В данной статье приводится расчет коэффициента токсичности и индекса экологического риска для оценки потенциального экологического риска загрязнения земель. Описываемый методический подход основан на количественной оценке содержания химических элементов в почве и расчетном коэффициенте токсичности элементов. Коэффициент токсичности рассчитывается с учетом содержания загрязняющих веществ в разных компонентах экосистемы.

С нашей точки зрения, экологический риск – это вероятность наступления события, имеющего неблагоприятные последствия для окружающей среды, обусловленного негативным воздействием хозяйственной и иной деятельностью человека, которая может привести к возникновению угроз экологической безопасности.

Методика и объекты исследований. Коэффициент токсичности, применяемый при расчете экологического риска, включает данные о потенциальных миграционных путях загрязняющих веществ. Также коэффициент токсичности учитывает значения и более сложных угроз для экосистемы. Для оценки токсичности элементов использовались исходные данные валового их содержания в различных компонентах экосистем (таблица 1) [2, 3, 10].

Апробация методического подхода проводилась по данным Национальной системы мониторинга окружающей среды (НСМОС) в отношении городов Минской области (Минск, Молодечно, Борисов, Слуцк, Воложин, Солигорск) и промышленных функциональных зон.

В отношении городов использовались данные, касающиеся содержания кадмия, цинка, свинца, меди, никеля и марганца в почвах за период 2010-2015 гг., по промышленным функциональным зонам – данные по содержанию соединений кадмия, цинка, свинца, хрома, меди, никеля и мышьяка в слое почв 0-5 см, полученные по результатам обследований в 2015 г. [4, 5, 6, 7, 8, 9].

Результаты и их обсуждение. Оценка экологического риска, возникающего в результате поступления химических веществ в землю, производится с целью определения потенциальной экологической опасности химического загрязнения земель. Потенциальность (или вероятность) загрязнения земель химическими элементами в данном контексте заключается в том, что при увеличении содержания этих химических элементов в почве экосистема будет самоочищаться. При более критическом загрязнении земель экосистема будет адаптироваться и значительно меняться.

Таблица 1. – Среднее содержание химических элементов в почве, питьевой воде, наземных растениях, наземных животных, кларк, фоновое содержание, ПДК, мг/кг или мг/л

Химические элементы	Кларк [10]	Почва (ср.знач.)	Питьевая вода [1]	Наземные растения [1]	Наземные животные [1]	Фоновое содержание [4-10]	ПДК/ОДК [2]
Mn, марганец	247	235	0,012	630	0,2	174	-
Zn, цинк	51	88	0,01	100	160	18,7	55
Cu, медь	13	14	0,01	14	2,4	4,05	33
Pb, свинец	12	11	0,005	2,7	2,0	6,82	32
Ni, никель	20	18	0,01	3,0	0,8	3,86	20
V, ванадий	34	36	0,001	1,6	0,15	34,0	150
Mo, молибден	1,1	2,0	0,00035	0,9	0,2	1,50	10
Sn, олово	2,5	10	0,00004	0,3	0,15	10,0	100
Cd, кадмий	0,13	0,43	0,00032	0,6	0,5	0,30	0,5
Co, кобальт	6,0	8,0	0,0009	0,5	0,03	6,00	20
Cr, хром	36	67,9	0,00018	0,23	0,075	36,0	100
Hg, ртуть	0,033	1,37	0,00008	0,015	0,046	1,00	2,5
As, мышьяк	1,7	3,07	0,0004	0,2	0,2	1,70	2,0

Эти изменения в каждом конкретном месте будут зависеть от микроусловий участка, уровня загрязнения и буферной способности экосистемы и однозначно оценить отрицательный эффект изменения экосистем достаточно сложно.

В предлагаемом методическом подходе основным суммирующим коэффициентом является коэффициент токсичности элемента. Расчет коэффициента токсичности проводится следующим образом: в каждом показателе (кларк, почва, питьевая вода, наземные растения, наземные животные) берется химический элемент с самым высоким содержанием и присваивается ему

значение 1,0. Остальным элементам присваивается значение, равное значению во сколько раз их содержание меньше максимального значения. Например, концентрация кадмия в почве в 547 раз ниже ($Mn\ 235 / Cd\ 0,43 = 547$), чем марганца и так далее (таблица 2). Полученные значения компонентов экосистемы распределили по каждому элементу, эти данные представлены в таблице 3.

В столбце 7 таблицы 3 представлены данные по сумме пяти компонентов экосистемы для каждого элемента (например: $Mn\ 804 = 1,0 + 1,0 + 1,0 + 1,0 + 800$).

Таблица 2. – Относительные величины химических элементов в почве, питьевой воде, наземных растениях, наземных животных, кларке

№ п/п	Кларк	Почва	Питьевая вода	Наземные растения	Наземные животные
1	1,0-Mn	1,0-Mn	1,0-Mn	1,0-Mn	1-Zn
2	4,8-Zn	2,7-Zn	1,2-Zn	6,3-Zn	66,7-Cu
3	6,9-Cr	3,5-Cr	1,2-Ni	45-Cu	80-Pb
4	7,3-V	6,5-V	1,2-Cu	210-Ni	200-Ni
5	12,4-Ni	13,1-Ni	2,4-Pb	233-Pb	320-Cd
6	19-Cu	16,8-Cu	12,0-V	394-V	800-Mn
7	21-Pb	21-Pb	13,3-Co	700-Mo	800-Mo
8	41,2-Co	24-Sn	34,3-Mo	1050-Cd	800-As
9	99-Sn	29,4-Co	37,5-Cd	1260-Co	1067-V
10	145-As	76,5-As	66,7-Cr	2100-Sn	1067-Sn
11	225-Mo	118-Mo	30,0-As	2739-Cr	2133-Cr
12	1900-Cd	172-Hg	150-Hg	3150-As	3478-Hg
13	7485-Hg	547-Cd	300-Sn	42000-Hg	5333-Co

Таблица 3. – Суммы относительных величин химических элементов и индекс содержания

Элемент	Кларк	Почва	Питьевая вода	Наземные растения	Наземные животные	\sum_{1}^5	\sum_{1}^4	Индекс содержания
Mn	1,0	1,0	1,0	1,0	800,0	804	4	1
Zn	4,8	2,7	1,2	6,3	1,0	16	10	2,43
Cr	6,9	3,5	66,7	2739,0	2133,0	4949	2210	553
V	7,3	6,5	12,0	394,0	1067,0	1487	420	105
Ni	12,4	13,1	1,2	210,0	200,0	437	227	56,7
Cu	19,0	16,8	1,2	45,0	66,7	149	82	20,5
Pb	21,0	21,0	2,4	233,0	80,0	357	124	31,1
Co	41,2	29,4	13,3	1260,0	5333,0	6677	1344	336
Sn	99,0	24,0	300,0	2100,0	1067,0	3590	1490	373
As	145,0	76,5	30,0	3150,0	800,0	4201	1052	263
Mo	225,0	118,0	34,3	700,0	800,0	1877	1077	269
Cd	1900,0	547,0	37,5	1050,0	320,0	3855	1955	489
Hg	7485,0	172,0	150,0	42000,0	3478,0	53285	11285	2821

Для того чтобы сбалансировать полученные цифры и снизить влияние возможно случайных больших чисел, суммируем значения компонентов экосистемы за исключением максимального значения (пример: $Mn\ 4=1,0+1,0+1,0+1,0$) (столбец 8, таблица 3).

Значения столбца «Индекс содержания» были получены делением суммы каждого элемента из столбца 8 на минимальное значение – 4 (это значение Mn, марганца) этого столбца. Например: $Cd\ 1955 / Mn\ 4 = 489$. Рассчитанный индекс содержания имеет большой предел разброса значений и не учитывает природное поглощение элемента (фоновые значения) и предельно допустимый уровень элементов в почвах (ПДК/ОДК). Для учета этих показателей рассчитывается индекс поглощения (таблица 4).

Расчет индекса поглощения проводится делением фонового значения на ПДК. Затем, для соизмеримого их представления, делим на 10^{-2} . (например: $Zn\ 34,0 = (18,7 / 55) / 10^{-2}$).

Затем перемножаем индекс содержания и индекс поглощения. Это дает нам следующий возрастающий ряд значений (пример: $Zn\ 83 = 2,43 \times 34,0$ и округляем до целого числа):

$Mn=12, Zn=83, Cu=252, Pb=663, Ni=1093, V=2377, Sn=3722, Mo=4036, Co=10079, Cr=19893, As=22352, Cd=29310, Hg=112846$.

Эти значения велики, и для их сближения делим на наименьшее число 12 (значение Mn). Получаем следующий ряд (пример: $Zn\ 7 = 83 / 12$):

$Mn=1, Zn=7, Cu=21, Pb=55, Ni=91, V=198, Sn=310, Mo=337, Co=840, Cr=1658, As=1863, Cd=2443, Hg=9404$.

Затем, чтобы уменьшить числовые значения и сохранить порядок соотношений, извлекаем корень квадратный:

$Mn=1, Zn=3, Cu=5, Pb=7, Ni=10, V=14, Mo=18, Sn=18, Co=29, Cr=41, As=43, Cd=49, Hg=97$.

Для кадмия и ртути коэффициенты получились очень высокие. Учитывая неабсолютность данного методического подхода, округляем значения. Коэффициент для этих элементов принимаем 40.

После округлений получаем ряд коэффициента токсичности (T_i):

$Mn=1, Zn=3, Cu=5, Pb=7, V=15, Ni=10, Mo=20, Sn=20, Co=30, Cr=40, Cd=40, As=40, Hg=40$.

Экологический риск загрязнения земель оценивается по коэффициенту экологического риска в отношении каждого химического элемента. Коэффициент экологического риска рассчитывается по формуле 1:

$$E_i = T_i \frac{C_s}{C_b}, \quad (1)$$

где: E_i – коэффициент экологического риска i -го элемента;

T_i – коэффициент токсичности i -го элемента;

C_s – фактическая концентрация i -го элемента, мг/кг;

C_b – фоновая концентрация i -го элемента, мг/кг;

Таблица 4. – Фоновое содержание химических элементов в почвах, ПДК и индекс поглощения, мг/кг

Химический элемент	Фоновое содержание [4-10]	ПДК/ОДК	Индекс поглощения, 10^{-2}
Mn, марганец	174	1500	11,6
Zn, цинк	18,7	55	34,0
Cu, медь	4,05	33	12,3
Pb, свинец	6,82	32	21,3
Ni, никель	3,86	20	19,3
V, ванадий	34,0	150	22,7
Mo, молибден	1,50	10	15,0
Sn, олово	10,0	100	10,0
Cd, кадмий	0,30	0,5	60,0
Co, кобальт	6,00	20	30,0
Cr, хром	36,0	100	36,0
Hg, ртуть	1,00	2,5	40,0
As, мышьяк	1,70	2,0	85,0

При полиэлементном загрязнении экологический риск оценивается по индексу экологического риска. Индекс экологического риска рассчитывается по формуле 2:

$$R_i = \sum_{i=1}^n E_i \quad (2)$$

где: R_i – индекс экологического риска n -го количества химических элементов, но не более восьми элементов;

E_i – коэффициент экологического риска i -го элемента.

Опасность химического загрязнения земель оценивается по уровню экологического риска (R_i) (таблица 5). Уровень экологического риска определяется: при моноэлементном загрязнении – по коэффициенту экологического риска (E_i), при полиэлементном загрязнении – по индексу экологического риска.

Для апробации вышеприведенного методического подхода мы провели расчет экологического риска загрязнения земель тяжелыми металлами городов Минской области и промышленных функциональных зон республики. Данные по содержанию тяжелых металлов в почвах, используемые при расчете, представлены в таблице 6.

Содержание химических элементов в почвах промышленных функциональных зон и городов Минской области в большинстве были одного порядка. Несколько большее содержание кадмия и никеля было в промышленных функциональных зонах по сравнению с городской территорией. Так, содержание химических элементов в почвах исследуемых территорий находилось в пределах: Pb 17,3-48,3 мг/кг; Zn 63,0-171; Cd 0,16-1,65; Ni 6,8-29,7; Cu 14,7-62,2; Mn 273-482 мг/кг, хрома (Cr) – 67,9, мышьяка (As) – 3,07 и 19,5 мг/кг почвы.

Таблица 5. – Уровни экологического риска химического загрязнения земель [1]

Уровень экологического риска	Коэффициент экологического риска (E_i)	Индекс экологического риска (R_i)
Низкий	<40	<150
Умеренный	40-80	150-300
Значительный	80-160	–
Высокий	160-320	300-600
Очень высокий	> 320	> 600

Таблица 6. – Содержание тяжелых металлов в почвах городов (максимальные значения на одной из пробных площадок) и промышленных функциональных зонах республики, мг/кг

Химический элемент	Промышленно-функциональные зоны		Города Минской области						ПДК / ОДК
	металлурго-машинно-строительный комплекс	промышленно-строительный комплекс	Борисов	Воложин	Минск	Молодечно	Слуцк	Солигорск	
Свинец, Pb	48,3	33,8	31,3	17,3	34,7	31,2	46,5	21,2	32,0
Цинк, Zn	171	147	132	106	102	147	63,0	75,3	55
Кадмий, Cd	0,75	1,65	0,36	0,28	0,48	0,32	0,48	0,16	0,5
Хром, Cr	67,9	-	-	-	-	-	-	-	100
Никель, Ni	29,7	-	22,5	12,0	12,9	11,8	10,0	6,8	20
Медь, Cu	62,2	-	19,2	14,7	83,8	57,8	23,7	22,9	33
Мышьяк, As	3,07	19,5	-	-	-	-	-	-	10,0
Марганец, Mn	-	-	393	482	390	421	306	273	-

Если сравнить эти данные с действующими гигиеническими нормативами, (ПДК/ОДК) то видно, что в промышленно-функциональных зонах содержание исследуемых химических элементов в почвах превышает ПДК/ОДК по всем элементам (за исключением хрома), в Борисове отмечено превышение по цинку и никелю, в Минске – по свинцу, цинку и меди, в Молодечно – по цинку и меди, в Слуцке – по свинцу и цинку, в Солигорске – по цинку.

Расчет потенциального экологического риска промышленных функциональных зон и городов Минской области по данному методическому подходу представлен в таблице 7.

Коэффициент экологического риска показывает уровень экологического риска конкретного загрязнителя. Этот показатель в значительной степени зависит от коэффициента токсичности. Если изначальное содержание элемента в почве невысокое и при этом он легко мигрирует в компоненты экосистемы, то такой загрязнитель получит максимальный коэффициент токсичности и для перехода содержания загрязняющего элемента на следующий уровень экологического риска достаточно однократного его увеличения относительно фона. И наоборот, если содержание химического элемента в почве высокое и потенциал миграции по компонентам экосистемы невысок, то такой элемент будет иметь минимальный коэффи-

циент токсичности и для перехода загрязняющего элемента на следующий уровень нужно будет сорокакратное его увеличение относительно фона.

Суммарный индекс экологического риска говорит об общем воздействии загрязняющих веществ.

Ранжирование и распределение расчетных данных исследуемых территорий по уровням экологического риска представлено в таблице 8.

Оценка содержания химических элементов в почве показала, что металлургомашиностроительный комплекс имеет высокий индекс экологического риска, и этот риск в значительной степени определяется содержанием кадмия. Территория промышленно-строительного комплекса имеет очень высокий индекс экологического риска и в значительной степени за счет содержания мышьяка и кадмия.

В городах Минской области индекс экологического риска по загрязняющим элементам в почвах находится на умеренном и низком уровнях. На этом фоне несколько выделяется Минск со значительным загрязнением отдельных территорий медью, что требует дополнительных исследований и мониторинга по этому элементу.

Расчет экологического риска загрязнения земель показывает потенциальный характер их загрязнения.

Таблица 7. – Коэффициент и индекс экологического риска содержания тяжелых металлов в почвах промышленных функциональных зон и городов Минской области

Исследуемая территория	Кадмий, Cd	Цинк, Zn	Свинец, Pb	Медь, Cu	Никель, Ni	Марганец, Mn	Хром, Cr	Мышьяк, As	Сумма, Σ
	E_i								R_i
металлургомашиностроительный комплекс	100	27	50	77	77	-	75	72	478
промышленно-строительный комплекс	220	24	35	-	-	-	-	459	737
Борисов	48	21	32	24	58	2	-	-	186
Воложин	37	17	18	18	31	3	-	-	124
Минск	64	16	36	103	33	2	-	-	255
Молодечно	43	24	32	71	31	2	-	-	203
Слуцк	64	10	48	29	26	2	-	-	179
Солигорск	21	12	22	28	18	2	-	-	103

Таблица 8. – Ранжирование индекса экологического риска для загрязняющих элементов исследуемых территорий

Индекс экологического риска Ri	Обследуемая территория		Ri	Потенциально экологический риск, E _i				
				Очень высокий E _i ≥ 320	Высокий 320 > E _i ≥ 160	Значительный 160 > E _i ≥ 80	Умеренный 80 > E _i ≥ 40	Низкий E _i < 40
Очень высокий Ri > 600	промышленно-строительный комплекс	737	As	Cd				Pb>Zn
Высокий 300 ≤ Ri < 600	металлурго-машиностроительный комплекс	478			Cd	Ni>Cu> Cr>As>P b		Zn
Умеренный 150 ≤ Ri < 300	Минск	255			Cu	Cd		Pb>Ni>Zn
	Молодечно	203				Cu		Cd>Pb>Ni>Zn
	Борисов	186				Ni>Cd		Pb>Cu>Zn
	Слуцк	179				Cd>Pb		Cu>Ni>Zn
Низкий Ri < 150	Воложин	124						Cd>Ni>Pb>Cu>Zn
	Солигорск	103						Cu>Pb>Cd>Ni>Zn

Выводы.

1. Данный методический подход позволяет оценить экологический риск загрязнения земель как при моноэлементном, так и полиэлементном загрязнении.

2. В методическом подходе учитывается максимальное количество известных показателей компонентов экосистем, что позволяет его применять при расчете экологического риска загрязнения земель для различных функциональных зон.

Список литературы

1. Hakanson, L. An ecological risk index for aquatic pollution control - a sedimentological approach / L. Hakanson // Water Research, 1980. – Vol. 14. – P.975-1001.
2. Гигиенические нормативы 2.1.7. 12-1-2004. Перечень предельно допустимых концентраций (ПДК) и ориентировочно допустимых концентраций (ОДК) химических веществ в почве. – Утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Республики Беларусь 25 февраля

2004. № 28.

3. Лукашэў, О. В. Фоновое содержание химических элементов в почвах и растительности особо охраняемых природных территориях Белорусского Поозерья / О. В. Лукашев [и др.] // Природопользование : сб. науч. тр. – Вып. 16. – Минск, 2009. – С. 57-63.
4. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2010 / Под общей редакцией С. И. Кузьмина, В. В. Савченко. – Минск, «Бел НИЦ «Экология». – 2011. – 308 с., ил. 311.
5. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2011 / Под общей редакцией С. И. Кузьмина, И. В. Комоско. – Минск, «Бел НИЦ «Экология». – 2012. – 320 с., ил. 318.
6. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2012 / Под общей редакцией С. И. Кузьмина. – [Электрон-

- ный ресурс
<http://www.ecoinfo.by/content/692.html> от 22 сентября 2017 года]. Электрон. текстовые, граф. данные. (173 Мб), – Минск, «Бел НИЦ «Экология». – 2013.
7. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2013 / Под общей редакцией М.А. Ереско. – [Электронный ресурс
<http://www.ecoinfo.by/content/691.html> от 22 сентября 2017 года]. Электрон. текстовые, граф. данные. (31,5 Мб). – Минск, «Бел НИЦ «Экология». – 2014.
8. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2014 / Под общей редакцией М.А. Ереско. – [Электронный ресурс
<http://www.ecoinfo.by/content/736.html> от 22 сентября 2017 года]. Электрон. текстовые, граф. данные. (50,0 Мб). – Минск, «Бел НИЦ «Экология». – 2015.
9. Национальная система мониторинга окружающей среды Республики Беларусь: результаты наблюдений, 2015/ Под общей редакцией М.А. Ереско [Электронный ресурс
<http://www.ecoinfo.by/content/753.html> от 22 сентября 2017 года]. Электрон. текстовые, граф. данные. (55,5 Мб). – Минск, «Бел НИЦ «Экология». — 2016.
10. Петухова, Н. Н. Геохимическое состояние почвенного покрова Беларуси / Н. Н. Петухова, В. А. Кузнецов // Природные ресурсы, 1999. – № 4. – С 40–49.
- References**
1. Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control – a sedimentological approach. Water Research. 1980, Vol. 14, pp. 975-1001.
2. *Gigienicheskie normativy 2.1.7. 12-1-2004. Perechen' predel'no dopustimyh koncentracij (PDK) i orientirovochno dopustimyh koncentracij (ODK) himicheskikh veshchestv v pochve* [Hygienic standards 2.1.7. 12-1-2004. The list of maximum permissible concentrations (MPC) and tentatively permissible concentrations (MPC) of chemicals in the soil]. – Utv. postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha Respubliki Belarus' 25 fevralya 2004, no 28. (In Russian)
3. Lukashov O. V., Zhukovskaya N. V., Lukasheva N. G., Savchenko S. V. Fonovoye sodержaniye khimicheskikh elementov v pochvakh i rastitel'nosti osobo okhranyayemykh prirodnykh territoriyakh Belorusskogo Poozer'ya'ya [Background content of chemical elements in soils and vegetation of specially protected natural territories of the Belarusian Lake District]. *Prirodopol'zovaniye* [Nature management]. Sb. nauch. tr. Vol. 16, 2009, pp. 57-63. (In Russian)
4. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudeniy*, 2010 [The National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation Results, 2010]. Eds. Kuz'mina S. I., Savchenko V. V. Minsk, «Bel NITS «Ekologiya». 2011, 308 p. (In Russian)
5. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudeniy*, 2011 [The National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation Results, 2011]. Eds. Kuz'mina S. I. Minsk, «Bel NITS «Ekologiya», 2012, 320 p. (In Russian)
6. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudeniy*, 2012 [The National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation Results, 2012]. Eds. Kuz'mina S. I. Available at: <http://www.ecoinfo.by/content/692.html> от 22 sentyabrya 2017 goda. Elektron. tekstovyye, graf. dannyye. (173 Mb), Minsk, «Bel NITS «Ekologiya», 2013. (In Russian)
7. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudeniy*, 2013 [The National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation Results, 2013]. Eds. Yeres'ko M.A. Available at: <http://www.ecoinfo.by/content/691.html> от 22 sentyabrya 2017 goda. Elektron. tekstovyye, graf. dannyye. (31,5 Mb), Minsk, «Bel NITS «Ekologiya». 2014. (In Russian)
8. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudeniy*, 2014 [The National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation Results, 2014]. Eds. Yeres'ko M.A. Available at: <http://www.ecoinfo.by/content/736.html> от 22 sentyabrya 2017 goda. Elektron.

- tekstovyye, graf. dannyye. (50,0 Mb), Minsk, «Bel NITS «Ekologiya», 2015. (In Russian)
9. *Natsional'naya sistema monitoringa okruzhayushchey sredy Respubliki Belarus': rezul'taty nablyudeniya*, 2015 [The National Environmental Monitoring System of the Republic of Belarus: Observation Results, 2015]. Eds. Yeres'ko M.A. Available at: <http://www.ecoinfo.by/content/753.html> ot 22 sentyabrya 2017 goda. Elektron.
- tekstovyye, graf. dannyye. (55,5 Mb), Minsk, «Bel NITS «Ekologiya». 2016. (In Russian)
10. Petukhova N. N., Kuznetsov V. A. Geokhimicheskoye sostoyaniye pochvennogo pokrova Belarusi [Geochemical state of the soil cover of Belarus]. *Prirodnyye resursy* [Natural Resources], 1999., no 4, pp. 40–49. (In Russian)

Received 5 July 2019